

a 学校编码: 10384
学号: 33120131152836

分类号____密级____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于紫外纳米软压印工艺的陷光结构研究

Light Trapping Structures Based On UV Soft Nanoimprint
Lithography

白彦强

指导教师姓名: 朱锦锋 副教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 白彦强

2016 年 6 月 2 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ √ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）： 白彦强

2016 年 6 月 2 日

摘要

随着科技的进步，很多器件在微纳尺寸下展现出很多与大块材料不同的性质，而这些性质中有很多具有很强的应用前景，这推动了微纳器件的加工方法的提高与性质的研究。

本文的第一章与第二章简单介绍了常见的纳米加工方法，包括电子束光刻（EBL）、微纳自组装法及纳米压印技术。通过分析各种加工方法的优劣，介绍了纳米压印技术的优势：它可以在保证加工精度较高同时又能降低其生产成本，而这两个优点为纳米压印的工业化做了很好的铺垫。在第二章中，通过对常见的三种纳米压印技术做出分析，并结合现有的设备，对纳米压印技术进行了相应的改进，并详细的介绍了纳米压印的各个加工步骤及需要注意的地方。

本文的第三章与第四章，是利用我们之前介绍的纳米压印的加工方法对超级吸收体及光学传感器这两种微纳器件进行加工。这两种微纳器件是基于表面等离子激元来进行设计的，而为了使加工器件更加有目的性，我们利用有限时域差分法对各种尺寸的微纳器件进行了仿真。通过扫描电镜以及原子力显微镜的观测我们再一次验证了纳米压印具有极高的精度，也正因此，我们实际测量的器件的光学特性与仿真结果有很好吻合程度，更重要的是，我们所设计加工的器件的性能相比之前的器件有很好的特性，具有很好的应用前景。对于超级吸收体，其吸收率在可达到 85%，而传感器的灵敏度达到 $RIU=514.7nm/RIU$ 。

关键词：纳米压印；超级吸收体；光学传感器

ABSTRACT

With the progress of science and technology, many devices in micro and nano size show a lot of different properties with bulk materials, and these fascinating properties promote the micro / nano fabrication method and the improvement of the properties.

The first and the second chapters of this paper briefly introduce the common fabrication methods, including electron beam lithography (EBL), nanosphere lithography and nanoimprint technology. Through the analysis of the advantages and disadvantages of various fabrication methods, this paper introduces the advantage of nanoimprint technology: it can ensure relatively precise nanostructures and reduce the cost of production, which are possible for mass production of large-area plasmonic devices. In the second chapter, we introduce three common nanoimprint technology and improve the nanoimprint technology based on the equipment we have. And the processing steps should be paid attention to introduce in detail in the second chapter.

In the third and the fourth chapters, we use the nanoimprint technology which is mentioned in the second chapter to process two micro and nano device namely the perfect absorber and optical sensor which are designed based on the surface plasmonic. We use the finite difference time domain method combined with metal dispersion relationship and related electromagnetic theory to study the properties of the two devices in different sizes. Through the result of scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM) we once again verify the nanoimprint lithography can ensure relatively precise nanostructures. That is why the results of measurement are fitted highly with the result of experiment. What is more, the devices we designed exhibit good characteristics compared to the previous devices. The absorption of the perfect absorber can reach 85%, and the sensitivity of the optical sensor can reach 514.7nm/RIU.

Key words: nanoimprint technology; perfect absorber; optical sensor.

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 纳米压印技术	2
1.2.1 热纳米压印技术	3
1.2.2 紫外纳米压印技术	3
1.2.3 软纳米压印技术	4
1.3 陷光结构材料	5
1.3.1 表面等离子激元与局域表面等离子激元	5
1.3.2 超级吸收体的应用前景	8
1.3.3 光传感器的应用前景	8
1.4 论文的架构以及意义	9
第二章 纳米压印工艺的探索	11
2.1 引言	11
2.2 实验器材及试剂	12
2.2.1 实验仪器	12
2.2.2 实验试剂	12
2.3 纳米压印系统工艺流程介绍	12
2.3.1 热纳米压印工艺	13
2.3.2 紫外纳米压印工艺	14
2.4 周期 500nm 的金属点阵的制备	15
2.4.1 实验步骤	16
2.4.2 结果分析	18
2.5 本章小结	20
第三章 超级吸收体的制备与性能研究	21
3.1 引言	21
3.2 超级吸收体的制备	21
3.2.1 超级吸收体的结构组成	21
3.2.2 超级吸收体的制备	23

3.2.3 超级吸收体的形貌表征.....	26
3.3 超级吸收体的性能仿真结果.....	28
3.3.1 时域有限差分法的基本工作原理.....	28
3.3.2 超级吸收体的工作性能的仿真模拟.....	33
3.4 超级吸收体的性能测量结果及其讨论.....	36
3.5 本章小结.....	40
第四章 传感器的制备与性能研究.....	41
4.1 引言.....	41
4.2 传感器的制备.....	41
4.2.1 传感器的结构组成.....	41
4.2.2 传感器的制备.....	42
4.2.3 传感器的形貌表征.....	43
4.3 传感器的性能仿真结果.....	44
4.3.1 孔洞直径对传感器性能的影响.....	45
4.3.2 孔洞深度对传感器性能的影响.....	45
4.4 传感器的远场光学特性的测量结果及其讨论.....	46
4.4.1 实验装置的改进.....	46
4.4.2 不同直径、深度对传感器性能改变的测量及其讨论.....	47
4.4.3 不同折射率液体下传感器性能的测量及其讨论.....	48
4.5 传感器的近场光学特性的测量结果及其讨论.....	50
4.5.1 近场光学的研究意义.....	50
4.5.2 近场光学显微镜及其原理.....	51
4.5.3 传感器的近场光学测量结果及其讨论.....	53
4.6 本章小结.....	54
第五章 总结与展望.....	57
5.1 总结.....	57
5.2 展望.....	58
参考文献.....	59
硕士研究生期间研究成果.....	63
致谢.....	64

CONTENTS

Chapter1 Preface	1
1.1 Introduction	1
1.2 Nanoimprint lithography	2
1.2.1 Thermal nanoimprint lithography	3
1.2.2 Ultra-violet nanoimprint lithography	3
1.2.3 Soft nanoimprint lithography	4
1.3 Metamaterial	5
1.3.1 Surface plasmon and localized surface plasmon	5
1.3.2 Promising applications of perfect absorber	8
1.3.3 Promising applications of sensor	8
1.4 The content schema and significance of this paper	9
Chapter2 The exploration of nanoimprint process	11
2.1 Introduction	11
2.2 Experimental apparatus and reagent	12
2.2.1 Experimental apparatus	12
2.2.2 Experimental reagent	12
2.3 Nanoimprint lithography	12
2.3.1 Thermal nanoimprint lithography	13
2.3.2 Ultra-violet nanoimprint lithography	14
2.4 The fabrication of metal nanodisks	15
2.4.1 Experimental procedure	16
2.4.2 Results and analysis	18
2.5 Summary	20
Chapter3 The fabrication and optical characteristic of perfect absorber	21
3.1 Introduction	21
3.2 The fabrication of perfect absorber	21
3.2.1 The composition of perfect absorber	21
3.2.2 The fabrication of perfect absorber	23

3.2.3 The AFM and SEM results of perfect absorber.....	26
3.3 Simulation results of perfect absorber.....	28
3.3.1 The principle of FDTD.....	28
3.3.2 Simulation results of perfect absorber.....	33
3.4 The optical characteristic of perfect absorber.....	36
3.5 Summary.....	40
Chapter4 The fabrication and optical characteristic of sensor.....	41
4.1 Introduction.....	41
4.2 The fabrication of sensor.....	41
4.2.1 The composition of sensor.....	41
4.2.2 The fabrication of sensor.....	42
4.2.3 The AFM and SEM results of perfect absorber.....	43
4.3 Simulation results of sensor.....	44
4.3.1 The optical characteristic of sensor with different nanovoid diameter	45
4.3.2 The optical characteristic of sensor with different nanovoid depth	45
4.4 Far-field optical properties of sensor.....	46
4.4.1 Improvement of experimental apparatus.....	46
4.4.2 The optical characteristic of sensor with different sizes.....	47
4.4.3 The optical characteristic of sensor in different refractive index liquid	48
4.5 Near-field optical properties of sensor.....	50
4.5.1 Research significance of near-field optics.....	50
4.5.2 Principle of near-field scanning optical microscope.....	51
4.5.3 Near-field optical results of sensor.....	53
4.6 Summary.....	54
Chapter5 Conclusion and Prospect.....	57
5.1 Conclusion.....	57
5.2 Prospect.....	58
References.....	59
Scientific research achievements.....	63
Acknowledgements.....	64

第一章 绪论

1.1 引言

随着科技的进步，人们在理论和实验中发现，当许多材料被加工为纳米尺度（ $<100\text{nm}$ ）时，会展现出与大块材料完全不同的性质。而且这些特性向人们展现出很多令人兴奋的应用前景^[1-2]。这些应用前景让纳米加工成了时下热门的一种高新技术。在这些热门的技术中，电子束与 X 射线曝光技术、聚焦离子束加工、扫描探针加工技术在精确度上是最好的，但由于其设备昂贵、加工效率较低，不满足商用技术的廉价、大面积生产的要求，使其一直局限于实验室研究中。而另一类以自组装纳米加工技术为代表，克服了之前介绍的技术的设备昂贵以及效率低的缺点，利用分子间通过非共价键的自发协同在制备样品，但却带来了结构可控性差、极易产生随机缺陷的缺点。所以为了推广纳米技术在商用产品中的应用，迫切地找到一种可以在满足廉价、可大面积生产的同时还可以有比较高的精度的加工技术。正是在这种背景下，纳米压印技术进入人们的视野，其模板是用电子束光刻技术加工而成，所以可以满足精度方面的要求，同时也让成本得到很好的控制，这让其应用在商用中成为可能。

左手材料^[3]在提出之后打开了人们对世界认识的一个全新窗口。而随着科技的进步，科学家对新型人工电磁媒介的研究和认识不止步于此，也提出一个更加一般化的名称电磁特异介质。电磁特异介质从本质上就是将具有特定几何形状的在宏观上可见的人造原子按照一定周期性或随机排列到基体材料表面，所构成的一种人工媒介。该介质与传统媒介的差别在于前者在宏观可见而后者是以微观可见的原子或分子为基本单元的。虽然与传统介质的单元尺寸差别较大，但两者对外电磁场的响应都是通过基本单元来实现的。因此，电磁特异介质从理论上可以随意设计其基本结构单元，也就可以灵活的改变各部分对外加电磁场的响应，实现任意的介电常数与磁导率且连续可调。显然它对于光和电磁波起到了很好的控制手段，对光子信息的传输也开辟了一条新的途径，具有重要意义。

1.2 纳米压印技术

纳米压印技术的本质是将模板中的图案通过技术手段进行大量复制的技术。目前，该技术可复制的模板特征尺寸在 5nm 以下，克服了传统微纳加工中光学衍射极限的限制。该技术具有超高分辨率、成本低、工艺简单和效率高的特点。高分辨率是由于其没有光学曝光以及电子束曝光的光学衍射现象；成本低是由于其仪器没有光学仪器那么复杂且模板可以多次重复使用；效率高是由于其可以并行处理，同时处理上百个器件。

1995 年 Stephen Y. Chou 教授受印章的启发在明苏达大学第一次提出纳米压印的概念^[4]。经过 20 年的发展，纳米压印的具体工艺由于材料、目标图形及加工手段的不同，有很多种分类。但其核心加工方法包括两个步骤：图形复制及图形转移，其基本原理如图 1.1 所示。常见的方法是在衬底上（如硅片）旋涂一层聚合物（如 PMMA，聚甲基丙烯酸甲脂），然后加热使 PMMA 成为玻璃态，再用刻有纳米图案的硬“印章”在一定的压力下压下去。因而，常见的纳米压印技术由于其原理的差别，大致可以分为三类：热纳米压印技术^[5]、紫外纳米压印技术^[6]以及软纳米压印技术^[7]。接下来简要对三种技术进行介绍。

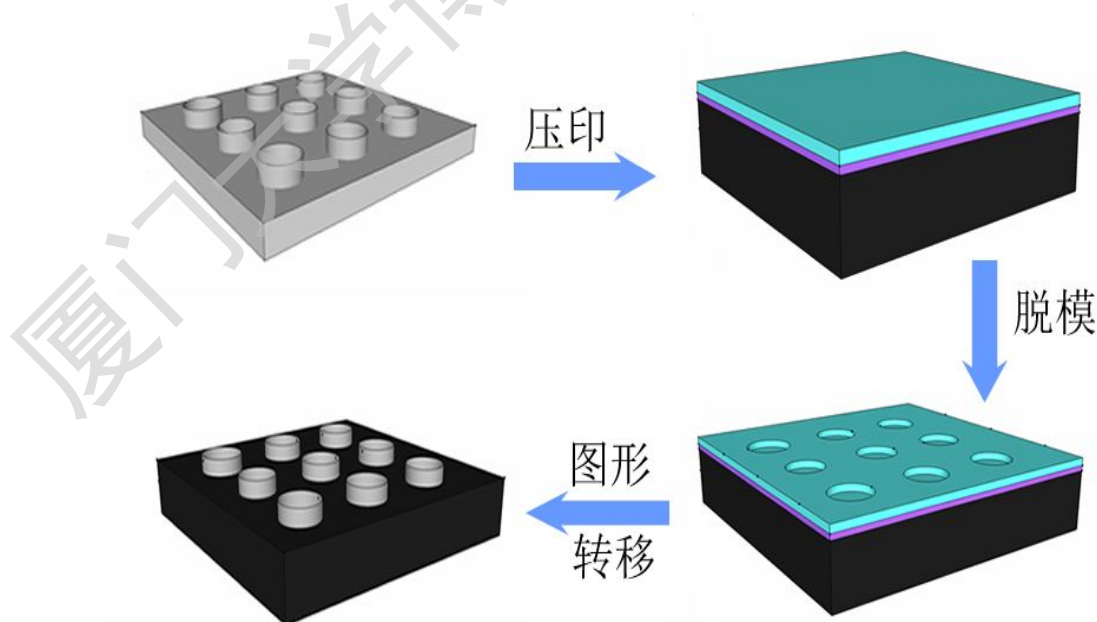


图 1.1 几种纳米压印的基本流程。不同之处只是模板材质不同、第一步的压印方式不同（如加热、紫外曝光）

1.2.1 热纳米压印技术 (Thermal-NIL)

热纳米压印是基于热塑性聚合物在加热后的流动性在实现模板图案的复制和转移的。热压印法的工艺过程包括压模制备、压印过程、图形转移三个步骤。其基本概念是用电子束光刻或其他先进技术,把坚硬的压模毛坯(通常为硅或镍)加工成一个压模;然后在用来绘制纳米图案的基片上(通常是硅片)旋涂一层聚合物薄膜(如 PMMA, 聚甲基丙烯酸甲酯),将其放入压印机中的腔体中并加热使腔内温度达到聚合物的玻璃化转变温度以上,并且把压模压在基片上的聚合物薄膜上,再把腔内温度降低到聚合物凝固点附近;最后将压模与聚合物层相分离,便在基片上获得了凸起的聚合物图案(还要稍作腐蚀以便除去凹处残留的聚合物)。图形转移有两种主要方法:一是刻蚀技术,另一种是剥离技术。刻蚀技术以聚合物为掩模,对聚合物下面层进行选择性的刻蚀,从而得到图案。剥离工艺一般先采用镀金工艺在表面形成一层金层,然后用有机溶剂进行溶解,有聚合物的地方要被溶解,于是连同它上面的金一起剥离.这样就在衬底表面形成了金的图案层,接下来还可以以金为掩模,进一步对金的下层进行刻蚀加工。

热纳米压印技术需要加热,而且在压印的过程中压力高达 10MPa。而在压印过程中基片如果不平整或者表面洁净度不够,会使整个压印过程产生很大的形变,而且会有毁坏压印系统或者模板的可能。同时由于压印模板与基片同属于硬质材料,所以在压印过程中很难消除两者带来的平行度以及平面度误差。再者由于热压印中在高温条件下由于热膨胀的原因会引起转移图形尺寸的误差,造成图像失真;重要的是在压印过程中的热胀冷缩还会引起脱模困难,对于模具或者基片纳米结构可能带来损坏,这也成了热压印发展中最大的障碍。

1.2.2 紫外纳米压印技术 (UV-NIL)

紫外纳米压印技术是利用光敏材料来替代热纳米压印中的热塑性材料的常温纳米压印技术^[8]。由于紫外压印是利用紫外光来对光敏胶进行固化定性,因而全程不需要高温处理,也就避免了模板和基片在高温下的形变问题。紫外纳米压印同样包括三个步骤:模板的制作、紫外曝光及图形转移。首先制备一个透明(以便紫外光透过)的表面具有纳米图形的模板(通常为石英),模板的制作通常采用电子束直写技术;在干净的基片(通常为硅片)上旋涂一层光敏胶;用模板在

一定压力下压在涂有光敏胶的基片上,通过紫外光照射使处于紫外压印区域的光敏胶产生聚合反应以便固化成型;图形转移的方法与热纳米压印相同。

紫外压印通常发生的在室温以及较低的压力下(0.1MPa)进行纳米图案的复制和转移。这也让其避免了类似在热压印中高压可能是模板变形、高温带来的一系列可能的误差,也让它在脱模过程中更加容易,效率更高。这也让它具备了相较与热压印更好的商业应用前景,其唯一的限制条件是模板或者基片必须有一个是透明的。

1.2.3 软纳米压印技术(Soft-NIL)

在实际的纳米压印中,会遇到这么一种情况,基片面积很大,模板又属于一种硬质材料,在这种情况下大面积均匀压印就成了一个问题,这是基于这种背景产生了软纳米压印^[9]。其基本思路是利用软印章 PDMS (polydimethylsiloxane) 和分子自组装技术,通过软印章与基底接触的方式在基底表面自组装形成单分子层的纳米图案。流程主要包括:硬质模板的制作、PDMS 模板的制作、软纳米压印和图形复制转移。其中,硬质模板的制作方法与前两种纳米压印采用的方法相同。PDMS 软印章的获得方法是将 PDMS 的化学单体和交联剂溶液倒入硬质模板表面使其聚合成型。

软压印由于其技术特点让其有了独特的优势:具有较好的图形转移能力;使得模板具有良好的自清洁能力、更长的寿命;脱模容易;单次可转移面积较大;对周围实验环境要求较低;能够很好的适应基底以及模板之间的平行度以及平面度误差。但同时由于 PDMS 容易变形的特点,使得分辨率不是很高。

通过对以上三种纳米压印技术的描述,我们注意到虽然三种压印的基本步骤很相似,均为模板的制作以及纳米结构的复制转移。但是在原理上有所差异也就导致了其实验加工条件的不同,从而使其应用范围也有所不同^[10]。其中现有技术中,紫外纳米压印的工作尺寸最小可以达到 2nm,精确度也最高,效率也很高成为最具商用价值的纳米压印技术。也正是由于纳米压印技术的稳定性以及重复性较高,使得纳米压印成为少数可以工业化的纳米加工技术,在光子晶体^[11]、超材料^[12]、数据储存^[13]及传感器^[14]的加工制作中大放光彩。

尽管纳米压印具有一系列优点如成本低、可大面积生产及分辨率高等。但是

在工业生产中也不得不面对其工艺过程中带来一系列新的难题与挑战。比如：如何提高硬质模板的使用寿命、如何让纳米压印在大面积生产中更加适用、硬质模板如何更高效的制作、模具在压印过程中与聚合物的粘附问题、模具的清洁问题以及在去残胶过程中的精准把控。这些问题都是要将纳米压印技术更好的推向工业生产需要解决的问题^[15]。

1.3 陷光结构材料

陷光结构材料的种类有很多，用途也很广泛，而本节就本论文所涉及到的陷光材料的基本原理表面等离子基元以及微纳器件进行介绍。

1.3.1 表面等离子激元与局域表面等离子激元

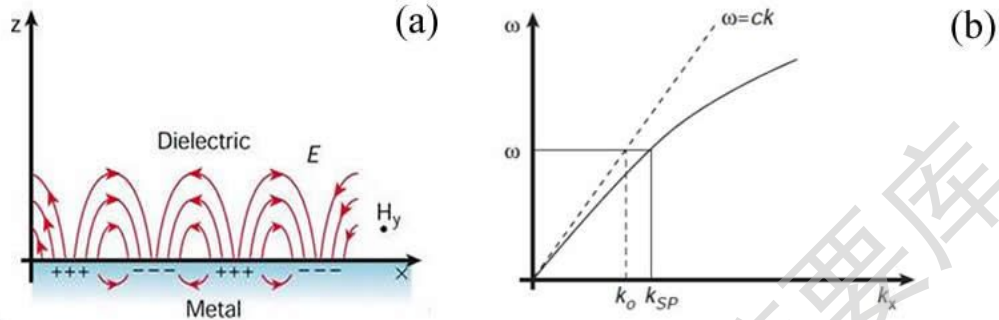
早在一百多年前，人们就发现贵金属（金银合金）纳米颗粒早可见光区域有很宽的宽带光吸收特性。这种现象实际上就是由于费米能级附近的导带上的自由电子在外部电磁场的作用下在金属表面发生集体的震荡，引起局域表面等离子激元的原因。

表面波是指束缚在不同材料界面上的波，是存在于物质表面的一种本征模式，它可以在物质表面进行传播，但其电场强度在界面垂直方向呈指数衰减。在电磁领域，最为人们所熟知的这类模式即为电磁等离子激元，它是对于一块均匀的天然的金属材料，金属表面的等离子和入射的电磁波耦合，形成一种新的准粒子——等离子激元。等离子激元是局限在金属和介质上传播的电磁本征模，他可以分为表面等离子激元（SPP）^[16-17]与局域表面等离子激元（LSP）^[18-19]。无论二者中的哪一种都具有亚波长效应以及电磁场的局域增强效应。因此常常被用在表面拉曼增强、纳米光子学、左手材料及亚波长光学等应用中。

对于表面等离子激元，在单一界面的情况下，如图 2.2（a）所示。对于 $z > 0$ 是介电常数大于 0 的介质层，而 $z < 0$ 是介电常数小于 0 的金属层。在这种情况下，表面等离子激元局域在 z 方向上沿 x 方向传播。经过推导，金属与介质界面上传播的 SPP 波的色散关系为：
$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}。$$

如图 2.2（b）所示为表面等离子激元的色散示意图。虚线表示的是光波矢量。从图中我们可以看出，在频率相同的情况下表面等离子激元的波矢量要比自由空间

的波矢量要大，也就是说无法直接通过平面波来激发表面等离子激元。也就是说要想激发表面等离子激元就必须解决波矢匹配问题，常见的方法有以下几种：



资料来源：上图为 William L. Barnes 等人 2003 年发表在 Nature 上的文章图例

图 2.2 (a) 表面等离子激元界面电荷与电场分布示意图。(b) 表面等离子激元的色散曲线

(1) 棱镜耦合，也称衰减全反射。有 Kretschmann 结构^[20]和 Otto 结构^[21]两种。在 Kretschmann 结构中，将金属薄膜镀在棱镜（折射率是 n_p ）表面，当入射光波（波矢量为 k_0 ）的入射角度大于临界角时，会在棱镜和金属界面发生全反射，并产生一个消逝波，该消逝波的波矢量 $k = n_p k_0 \sin \theta$ 。该波矢量与原波矢量相比会有一个增强，使得其与波矢量 k_{SPP} 匹配成为可能。只要金属薄膜不是太厚就有可能激发金属/空气界面的 SPP 波。Otto 结构棱镜的表面与金属表面存在一个很窄的空气间隙，目的是利用棱镜和空气界面处全反射的消逝波来满足波矢量匹配的问题，从而激发金属/空气界面的 SPP 波。

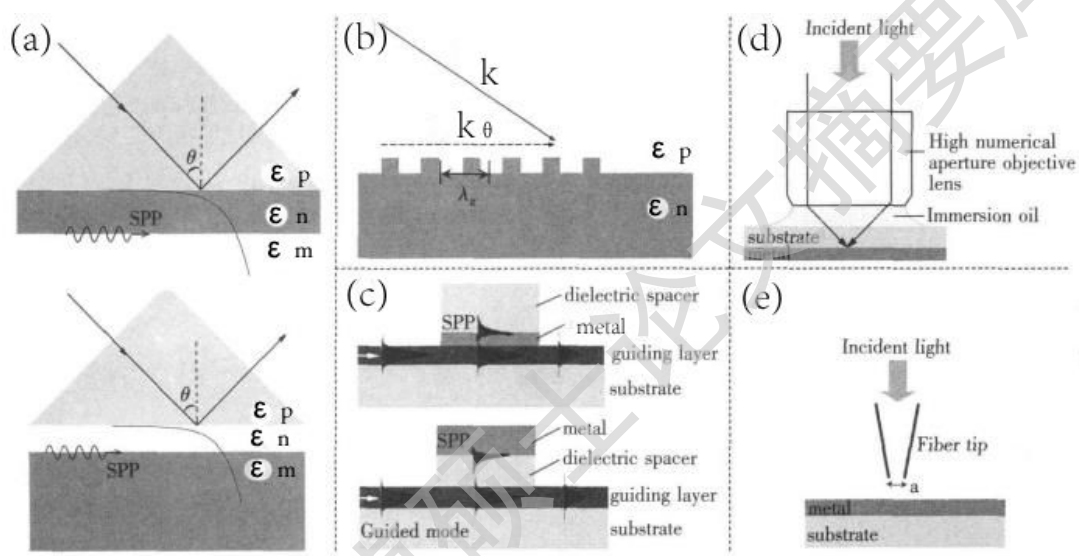
(2) 通过在金属/介质界面引入一个周期为 λ_g 的表面起伏，使光波入射到该界面时产生衍射波^[22]。它的波矢量会成倍地加上或者减去光栅矢量 k_g 从而使得波矢量匹配成为可能。同样，利用金属表面的缺陷（在金属表面做凹槽即可）也可能激发出 SPP 波。

(3) 波导模耦合。在介质层中传播的波导模式在波导两侧是消逝波。当在波导的特定位置镀一层金属之后。波导模在通过这个区域时就能够将波导中的光场能量耦合到 SPP 波中，而达到激发金属和介质界面 SPP 的目的。

(4) 强聚焦光束。原理与 Kretschmann 结构的原理基本相同。将高数值孔

径的显微镜通过油浸层靠近一个镀有金属薄膜的介质层。入射光通过该显微镜聚焦到金属层与介质层界面。高数值孔径的显微镜可以提供很大的入射角，因而可以满足矢量匹配的问题，也即可以激发 SPP 光波。

(5) 近场激发^[23]。用一个亚波长的探针在近场的情况下照射金属表面。由于针尖的尺寸很小，所以从针尖出光会包含大量波矢量大于或者等于 SPP 波矢量的光波，从而满足矢量匹配的问题，从而可以局部激发 SPP 光波。



资料来源：参考自张雪姣发表的表面等离子共振双光束差分研究和数值模拟

图 2.3 激发 SPP 示意图 (a) 棱镜耦合示意图，上图为 Kretschmann 结构，下图为 Otto 结构。(b) 利用周期结构来达到波矢量匹配。(c) 波导模耦合来达到波矢量匹配。(d) 强聚焦光束来达到波矢量匹配。(e) 近场激发来达到波矢量匹配

局域表面等离激元可以把电磁场的能量局域在一个很小的尺度。局域表面等离激元是金属纳米颗粒中的自由电子，在外界电磁场下激发下的局域震荡，电荷主要分布在结构的端点处，从而使产生的电磁场主要集中在金属纳米颗粒周围，而不会沿表面传播。相较与表面等离激元，局域表面等离激元的激发更加容易，其共振频率取决于金属结构的尺寸、材料以及外界的介电环境，可调范围广，可选择吸收或者散射不同频率的光，这促使人们对局域表面等离激元有着更广泛的兴趣研究。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.